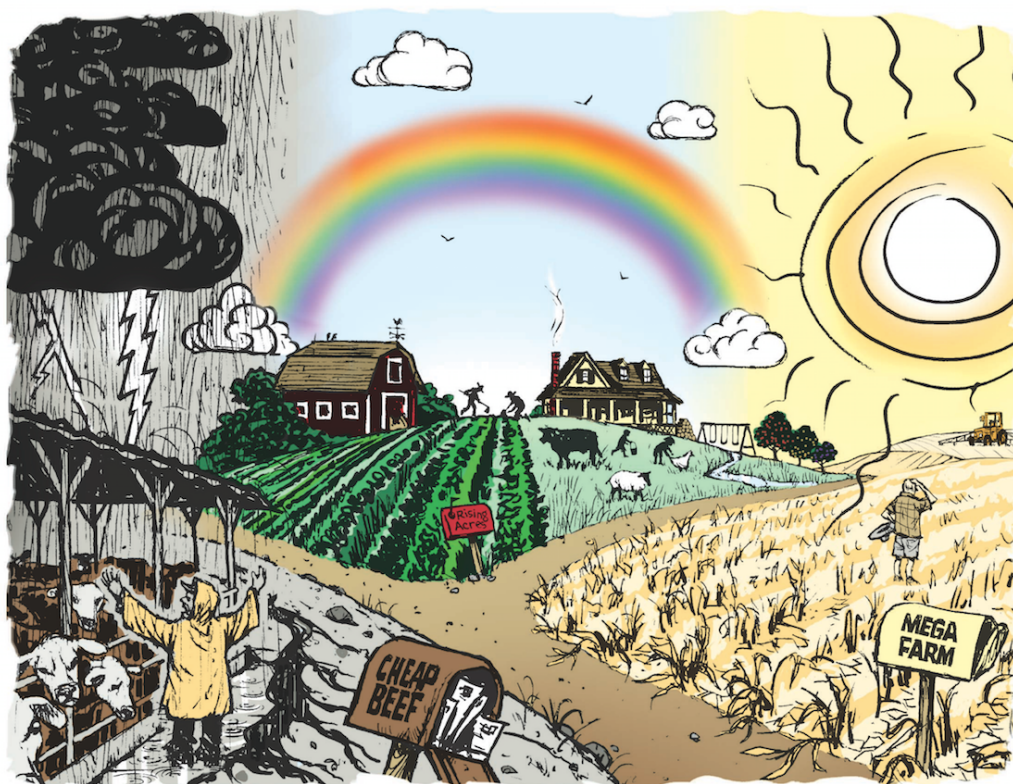


土壌炭素の 修復： 生物学はその役割を果たせる か？



NOFA/Mass政策担当
ジャック・キトリッジ

www.nofamass.org

Northeast Organic Farming Association/Massachusetts Chapter, Inc.

2015 年 8 月 14 日

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM



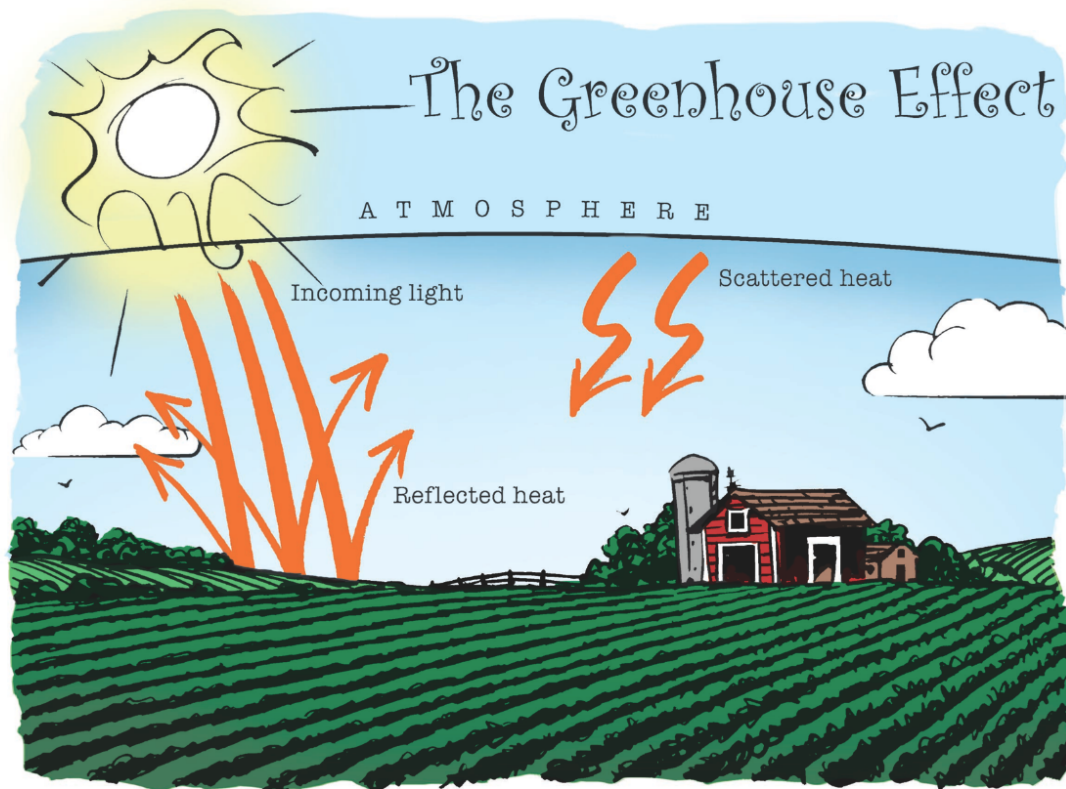
翻訳提供：Regeneration International

世界を涼しく。地球に食糧を。

詳細はこちらをご覧ください：

www.regenerationinternational.org/international-translations/





はじめに

近年、科学や政治団体によって交わされる議論は、温室効果ガス排出とその結果生じる異常気象にどのように対処すべきかに重点が置かれている。多くのアナリストは、私たちがこれ以上の気象危機と、それに関連する人災、経済的混乱、それらがもたらす社会的対立とを減らしたいと望むならば、大気中の炭素をこれ以上増やさないよう化石燃料の燃焼を食い止め、すでに空気中にある炭素を除去する方法を見つける必要があると考えている。

しかし、空気中から除去した炭素はどこに置けばいいのか？ 実際的な方法は1つしかない。それらが属していた場所、つまり土壌に戻るのである。幸いなことに、これは費用のかかる処理ではない。しかし数多くの人々から参加の同意を得なければならない。合理的な理由なしに自分たちの行動を変える人はほとんどいないので、私たちはこの短い論文を執筆した。私たちはこの論文が、二酸化炭素の蓄積と気候変動に関する問題、どうすれば炭素を空気中から取り除いて土壌に戻せるのか、炭素を豊富に含む土壌を増やすことで農家や消費者が得られる利点理解する手立てとなることを願っている。

気候変動

異常気象は、文書化が困難であることで有名である。それを行うには長期間にわたる良質なデータと、異常性を構成するものの明確な基準が必要になる。しかし近年、これまで以上に多くの人々がこの議題に関心を持ちはじめ、データや基準の開発が進められた。異常気象の主な要素は、過度の熱さ、降雨、空気中の湿度である。最近の研究で、月平均気温、過度の降雨現象、空気中湿度の平均含有量が、過去50年から150年の間にすべて上昇していることが明らかになった（Coumou）。

多くの科学者は、こうした予測不能な極端さの原因が、大気中の温室効果ガス（GFG）の「人為的」（＝人間の活動が原因）蓄積にあると考えている。異常気象現象に関する厳密なモデリング研究や分析によって、人類が引き起こした気候変動は、上記のような多くの異常性の要因となることが明らかになった（Peterson）。アメリカ科学振興協会は、「気候科学者の約97%が、確固たる証拠に基づいて、人類が引き起こした気候変動が発生していると結論付けている」としている（AAAS）

温室効果ガスがなぜ 気候変動を発生させるのか？

温室効果ガスは主として二酸化炭素だが、メタン、オゾン、亜酸化窒素も含まれ、何百万年もの間、動物の呼吸、沼地のガス放出、窒素固定細菌（EPA）からの放出、といった自然のプロセスによって土壌や水から大気中に放出されてきた。また、これらのガスは自然作用によって分解され、継続的循環で再び元の場所に戻る。排出される温室効果ガスの量と元に戻る量のバランスが取れている限り、気候変動は生じない。

私たちは、大気中に一定レベルの温室効果ガスを必要とする。それらは太陽放射を捕えるため、地球が大気圏外へ反射する量が少なくなる。それにより、気候の要因となる、惑星の力を推進させる熱の量が増える。私たちにそのようなガスが無ければ、地球は一年中氷で覆われ、寒すぎて人類は住めなくなる。大気中のガス量は「100万分の1」

（ppm）と呼ばれる単位で測定される。窒素、酸素、アルゴンが大気中の主要なガスであり、合計量は999,000ppmである。人類の歴史を通じて、大気中の二酸化炭素の量はおよそ280ppm、または0.03%未満に保たれてきた。

炭素循環の人為的かく乱

しかし12,000年前に農業が始まったころから、人為的な森林破壊、開墾、作物の耕作によって過度の二酸化炭素が放出されてきた。氷床コアの分析や技術を使って、科学者らは大気中の二酸化炭素とメタンの、初期の急激な増加を発見した。それらは何千年も前

の、メソポタミアと中国における農業の拡大と一致する（Amundson）。

さらに後の時代、約1750年ごろからの化石燃料の燃焼の急速な増加と、より最近の農業の産業化により、GHGの人為的起源の規模と数は劇的に拡大した。今では土壌からの放出量が増え土壌に戻る数が減少しているため、空気中の二酸化炭素の量は増加を続けて400ppmに達している。

問題の及ぶ範囲

（数字が好きな方のために！）

注：この項目の計算は全てメートル法を使用している。1トンは1メートルトンで1,000kgまたは2204.6lbsに相当する。1ギガトン（Gt）は1億トンである。1ヘクタールは10,000 m²または2.47エーカーである。

科学者らは、壊滅的な気候変動を防ぐには大気中の二酸化炭素レベルを約350ppmに戻す必要があると予測している（NASA）（多くの研究者は、より安全な目標は産業革命以前のレベルとして推計される275～280ppmに近いと述べているが、公の議論では350に落ち着いている）。大気中の二酸化炭素の1ppmは、約7.8Gtに相当する。二酸化炭素の分子はほとんどが酸素で分子中の炭素は4分の1強に過ぎない（正確には27.3%）。従って大気中の二酸化炭素1ppmに含まれる炭素量は、2.125Gtである（例示的目的においてこれはおよそ、固体グラファイトの立方キロメートルである）。

私たちは350ppm以下の二酸化炭素で生活していく必要があるが、すでに400ppmに達しているうえさらに上昇を続けている。私たちに何ができるのか？

排出を低減できたら？

人類一体化して、温室効果ガスの過度な放出を止める必要があることには、疑問の余地がない。これらの放出の約3分の2は、化石燃料の燃焼が原因と推定されている（Ontl）。私たちは、化石燃料に頼ることを止め、代替エネルギー源を開発する必要がある。各国政府はこのことを十分に認識している。この目標を達成するためいくつかの国際グループが設立されている。人類の歴史にもたらすべき最も難しい変化の1つかもしいないが、生き延びたいのであれば私たちはそれを実行するための方針と仕組みを見つけなければならない。しかしこれは、私たちだけの問題ではない。

私たちが明日にも全ての放出を止めることが出来たらどうなるだろう？ すでに大気中に放出されているGHGが今後何十年、あるいは何世紀にもわたり地球を加熱し続けるだろう。この熱は氷や凍土を溶かし、海面を上昇させてまだ凍っている大量の温室効果ガ

スを放出させることになる。

これは、北極圏における潜在的問題の一例である。そこにある大量の凍ったメタン、強力なGHGが、融解によって大気中に放出される可能性がある。永久凍土層には大量の凍った炭素も含まれる。環境が温暖化するとこれらが微生物の消化作用にさらされ、二酸化炭素として吐き出される。沼地や湿地などの酸素がない場所でこの消化が発生すれば、その炭素は他の微生物によってメタンとして放出される（NSIDC）。

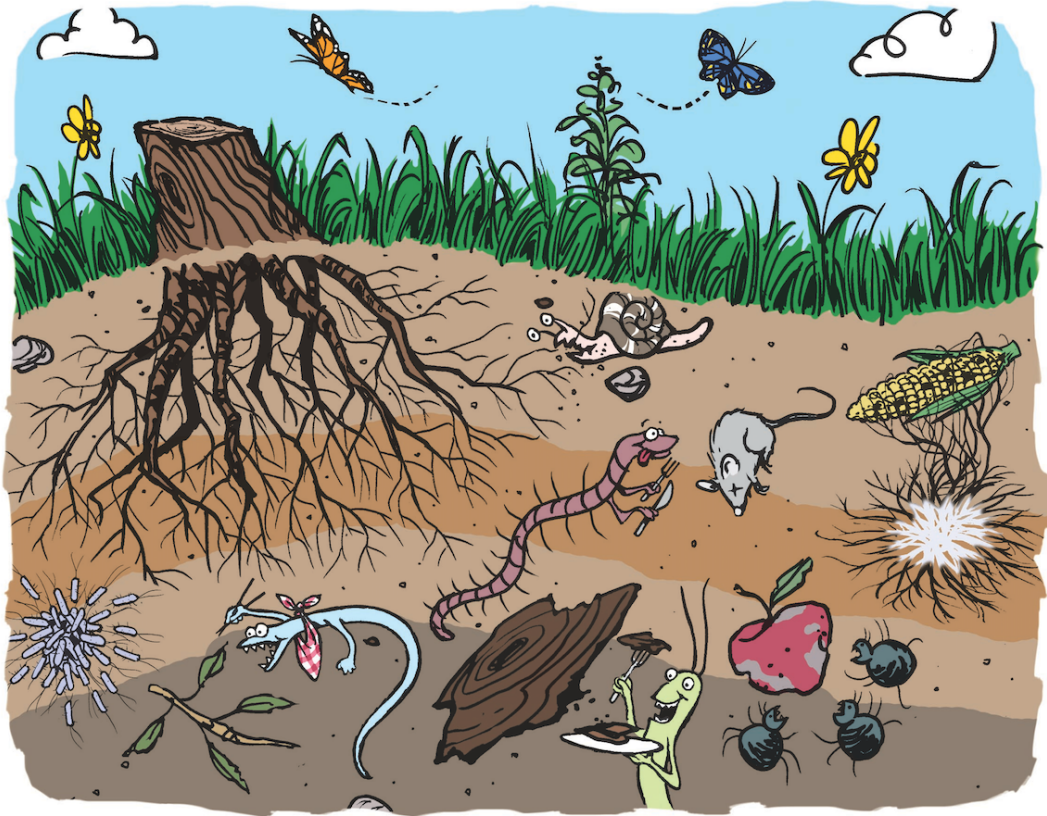
従って排出低下には十分ではない。いったんそれを行ったら、地球温度の上昇も止めなければならない。現在の二酸化炭素中の約400ppmを350ppmにすばやく戻したかったら、大気中の炭素を取り除いてそれをどこかに埋める必要がある。0ppmの二酸化炭素を長期間埋める場所を見つけなければならない。炭素の量は106.25Gtである。果たして実行できるのだろうか？

取り除いたすべての炭素をどこに配置すべきか？

表面が水分に覆われている地上の70%の部分では、大気中の炭素を安全に蓄積することはできない。二酸化炭素は水に溶けて炭酸を形成する。私たちは、海水中の炭酸量が徐々に上昇していく影響を何十年も目にしてきた。海洋の水素イオン濃度は減少し、酸性化によって貝、サンゴ、プランクトンなど数多くの海洋生物が破壊されている（NOAA）。

しかし、土壌への炭素の蓄積には別のストーリーがある。それは、炭素がどこから来て、どこで必要とされているかということだ。科学者らは、産業革命における農業の開墾、耕作によって世界中の土壌から136Gtの炭素が放出されたと計算している（Lal 2004）。つまり土地の開墾と耕作によって、戻すべき量以上の炭素が土壌から失われた。土壌にはどのくらいの炭素が残っているか？ はるかに多い。科学者らは、地下30cm（約1フィート）の土壌には約700Gtの炭素が含まれると計算している。地下1m（3フィート以上）の土壌を計算すると、数値は2倍以上の約1500Gtになる（Powlson）。かつてこれらすべての炭素を含有していた土壌が再びそれらを含有することができるのは明白だ。

しかし106.25Gtの炭素を土壌に戻すことについての疑問に答える前に、土壌のことをより深く理解してみる。



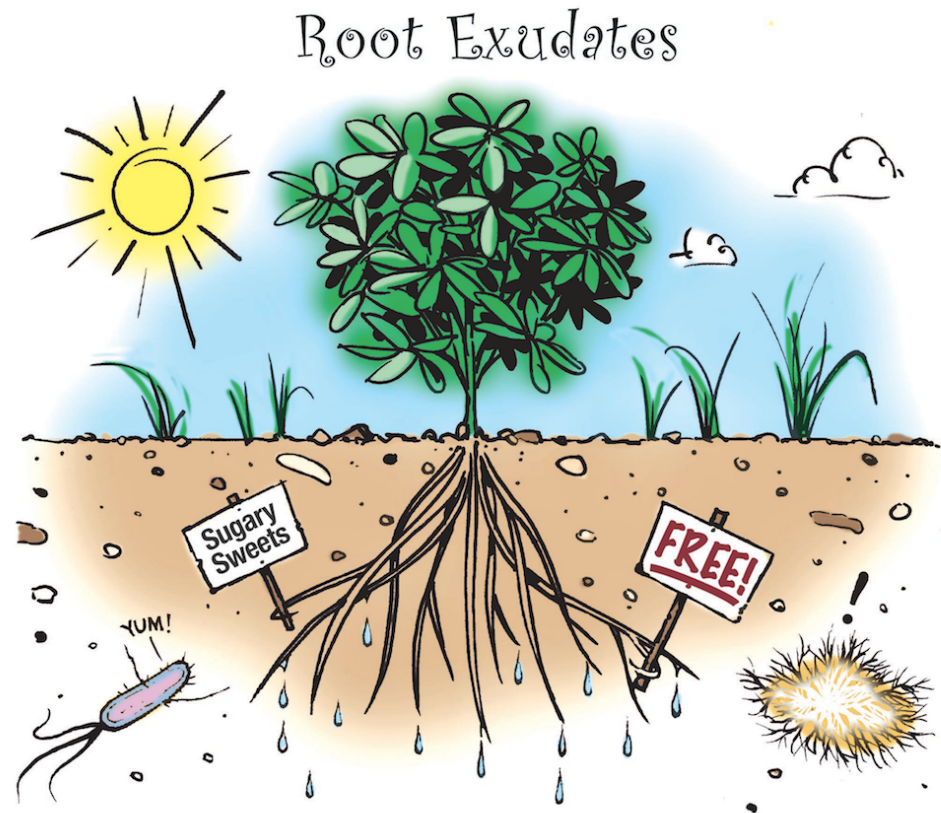
土壌の炭素渴望

土壌は実際に生きている。バクテリア、菌類、藻類、原生動物、線形動物、その他数多くの生物を豊富に含んでいる。小さじ1杯の健康な土壌の中には地球上の人間よりも多い数の微生物が含まれる（Hoorman）。もちろん炭素基盤の生物として、この群は、生き残るために絶えず有機物質を供給される必要がある。この有機物質（その約58%は炭素）は生きた有機体として取り込まれ、その滲出液は多くが単糖であり、残留物は多くがセルロースのような炭水化物である。これらの合成物はエネルギーを豊富に含み、有機体がすぐに利用でき、土壌の微生物によってすばやく吸収される。表土の単糖の半減期は、例えば土壌が使用される前では、1時間未満とされる（Dungait）。

土壌有機体の炭素への大きな食欲は、健康な土壌の中では、利用可能な有機物質が素早く吸収されるということを意味する。物体内に取り込まれるか、エネルギーとして燃焼され、二酸化炭素を放出する。アイオワ州にあるトウモロコシ畑1エーカーに含まれる微生物は、25人の運動中の健康な男性以上の二酸化炭素を排出する（Albrecht）。微生物が死ぬとその体内の炭素は、他の有機体の分解に使用されて吐き出される。

土壌内の有機体の活動は、1日の循環と同じように季節ごとに行われる。全ての有機体

が同時に活動するわけではない。いつであれ、ほとんどが活動しなくなるか不活動状態になる。食糧の可用性は、人口と土壌有機体の活動レベルに影響を及ぼす重要な要因である（FAO）。



光合成

しかし、炭素がそれほど急速に土壌に吸収されるのなら、なぜすばやく消滅しないのか？

答えは、植物がつねに供給を更新しているからである。35億年前からの進化の過程で、植物は大気中から炭素を取り込み、それを生命体へ戻す驚くべき力を使って生き延びてきた。これが、ご存知光合成と呼ばれるプロセスであり、ほとんど子供たちが学校で教わる。

光合成の働きは以下の通りである。植物の葉に含まれるクロロフィル分子によって光からエネルギーを吸収することが可能になり、そのエネルギーを使って水分子（ H_2O ）を水素原子と酸素原子に分解する。その後植物は、酸素原子を分子酸素（2つの酸素原子

を結合したもの— O_2)として大気に戻し、一時的に水素原子を蓄積する。光合成の第2段階では、水素原子が二酸化炭素分子と結合し(CO_2)、ブドウ糖($C_6H_{12}O_6$)のような単純糖質をつくる。

すべての化学反応同様、このプロセスは成分の利用可能性の影響を受ける。二酸化炭素は非常に低濃度(現在は0.04%)で大気に含まれるため、しばしばこのプロセスの制限要因となる(RSC)。ガスの濃度が高ければ、より多くのエネルギーが光から引き出され、より多くの水が植物に取り込まれて糖質の生成が増す(Ontl)。夜間や干ばつ時など他の状況では、光または水が制限要因となる場合がある。

このプロセスの途方もない大きさは、驚異的である。1エーカーの小麦畑は、1年間で、二酸化炭素の状態で8,900ポンドの炭素を取り込み、水と結合させて、糖質に変えることができる。得られる糖質の重さは22,000ポンド。このプロセスは非常に活発であるため、世界中の大気に含まれるすべての二酸化炭素のうち毎年15%が光合成生物を通り抜けると推計されている(SAPS)。

根滲出液

光合成はもちろん、植物やその他の光合成生物(藍藻など)に、生きている間に特別の役割を与える。すべての生物は炭素基盤であり、生き延びるために炭素を吸収する必要がある。人間が、植物のように、薄い大気から炭素を取り込むことができれば圧倒的に有利だろう。しかし人間はたとえ炭素化合物を作れなくてもそれを持っていなければならない。

ほかにどうすれば土壌微生物が炭素を得られるのか? 彼らはそれを「獲得」するのだ!

植物と土壌有機体に関して土壌科学者が発見したさらに驚くべきことの1つが、それらが互恵的關係によって共進化してきたということだ。

植物が光合成し葉緑体の中に糖質を生成すると、植物はそれら化合物を細胞や構造のために使ったり生命エネルギーのために使ったりする。しかし植物は、これら大量の化合物を「液体炭素」として土壌に「漏らす」、または「滲み出させる」(Jones SOS)。推計はさまざまだが、植物が光合成によって固定させた炭素の20~40%は、根圏(根を直接取り巻く土壌領域)に転移する(Walker)。

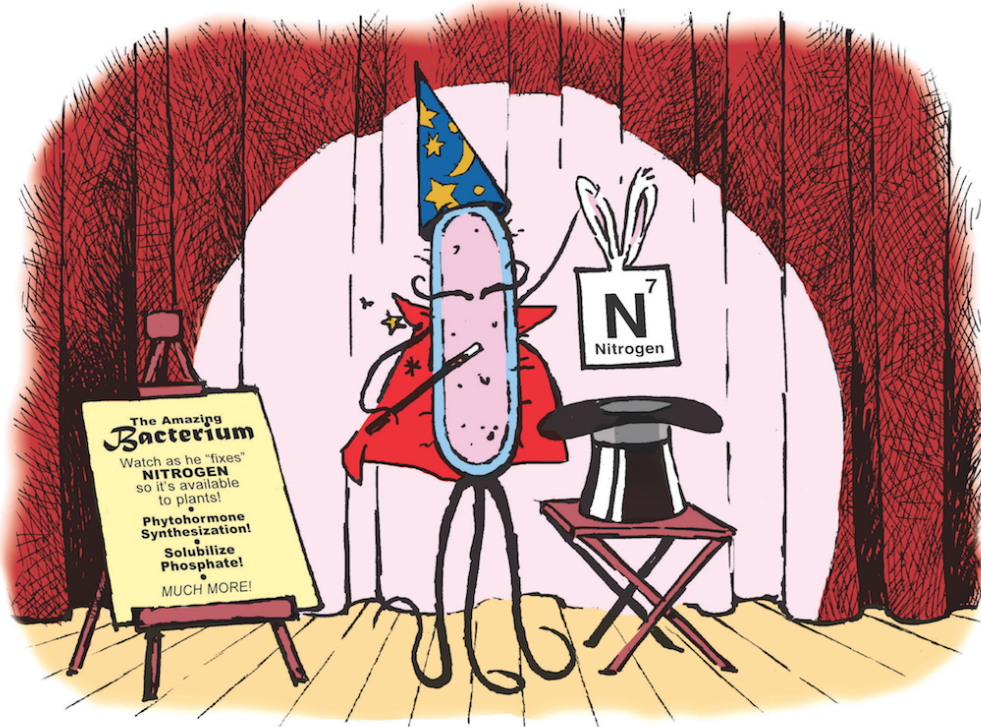
一体なぜ植物は糖を含む樹液を土の中に漏らすのか?

餌にするためである。

腹を空かせたバクテリア、菌類、その他の土壌有機体が、炭素を含むおいしい根滲出液を食べるためにすぐに現れる。しかし彼らはもっとたくさんの量をすぐに欲しくなる。それを得る最も良い方法は、植物の生成を促すことである。植物が健康で丈夫であれば、より多くの資源を光合成に充て、より多くの炭素を滲み出すことができる。そのようにして微生物は植物が繁茂しより多くの液体炭素を生成できるよう、多様な方法で植物を助けている。

土壌生化学の研究が進むにつれ、植物が根滲出液を通して、局所の土壌微生物群を調整し、草食動物の捕食に対処し、遠くの栄養源から栄養を「仕入れ」、近隣の土壌の化学および物理的特性を変え、競合する植物の成長を阻止して、自らの環境をコントロールする能力を備えていることがわかった。

The Magician



微生物共生

以下に述べることの多くは、現在も研究が継続中であることを断っておかねばならない。土壌はまだ学ぶべきことが数多く残されている未開拓分野である。微生物群は極めて多様である。そこに含まれる90～99%の種は、現在の技術では研究所で培養することすらできない（Jastrow）。

土壌微生物群は質量の90%以上がバクテリアおよび菌類である。これら2種類の有機体の厳密な比率は場合によって異なる。草原や森林などの不かく乱土壌は、糸状菌糸が乱されずに残っている菌類にとって有益である。一方で開墾や合成窒素肥料の使用は菌の数を減らす。

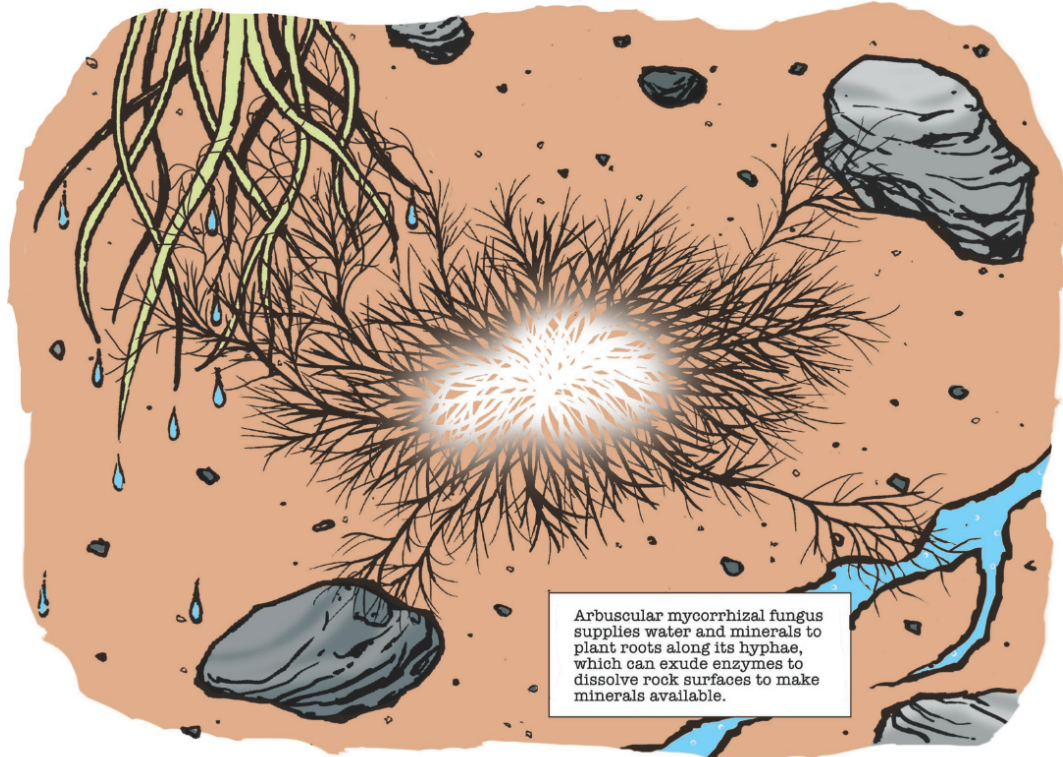
微生物遷移の主要因子は、周辺の物理的環境がそれらを保護するかどうかである。保護は粘土が行う。科学者らは、粘土は最適な水素イオン濃度を維持し、有害な代謝産物を吸収して、乾燥を防ぐことができると考えている。土壌の基質に含まれる小さな細孔（「潜伏」用）も、原生動物のようなより大きな有機体による小さな有機体の捕食を防ぐと考えられている（Six）。保護された有機体の死滅率は1日に1%未満であるのに対し、保護されていない有機体は日々70%以上が死滅すると報告されている。

バクテリア

バクテリアは驚くべき化学者である。植物成長促進根圏細菌（PGPR）と呼ばれるそれらのグループは、数多くの生化学的経路を通して働き植物を魔法のように助ける。あるものは、大気中の窒素を「固定」させ、植物が利用しやすい状態にする。またあるものは、その他は、植物の成長段階を改良する植物ホルモンを合成することができる。さらに、比較的不溶性の必須栄養素であるリン酸を可溶化し、植物の成長に利用できる状態にしたり、天然の殺菌剤を生成して植物の真菌性疾患への抵抗を助けたりする

（Velivelli）。あるPGPRは、小麦、シロツメクサ、ニンニクなど多くの一般的植物から隔離されている。このバクテリアは病原体とたたかうさまざまな抗生物質を生成し、病気とたたかう植物をサポートする（Timmusk）。

Reaching Out



菌類

微生物共生のもう一つの例が、アーバスキュラー菌根菌のものである。この共生で菌は、宿主植物の根と周辺の土壌という2つの異なる環境を長い菌糸でつないでコロニー化する。それにより、宿主植物の水分とミネラル栄養素の摂取がその菌糸を通ることで改善される。この関係は、リン、窒素、亜鉛、銅など多くの鉱物と関連して実証されている（Jansa）。いくつかの推計によれば陸上植物の90%以上が、アーバスキュラー菌根菌とのこの関係を享受している（Cairney）。

何人かの科学者は植物が必要とする栄養素の85～90%は、根滲出液が、植物には取得不可能な微量元素や鉱物と引き換えに微生物エネルギーを提供するときの炭素交換によって取得されるとしている（Jones SOS）。

この関係は両者にとって有益であり一切の負担がない。唯一必要な追加エネルギーは、太陽光が提供し、それによって、丈夫になった植物がさらに化合物を生成し、微生物に栄養を与えサポートすることを可能にする。

土壌団粒

このストーリーの重要な側面の1つが、「団粒」と呼ばれる土壌構造である。一握りの健康な土壌を強く握って放すと、小粒が多く現れる。これが団粒である。土壌が固い塊のままだと良質な団粒ではない。団粒は風や水による浸食に耐えうる安定性を持ち、なおかつ浸透性が高く空気、水、根の通過が十分に可能である。

団粒は土壌機能の基本単位であり、マメ科植物の根粒に似た働きをして保護された領域を作る（Jones SOS）。団粒は、土壌粒子を包んで巻き込む「粘着性のあるひも状の袋」を作る菌根菌の菌糸によって、形成を促される（Jastrow）。植物の根から出る液体炭素の滲出液や菌類によって、団粒壁を作る糊や粘着物質の生成が可能となる（Jones SOS）。

壁の内側では、再び炭素浸出液に促されて数多くの生物活動が発生する。ほとんどの団粒は植物の根とつながっており、その根の多くは良質な供給経路であるが、小さすぎてみえない菌根菌のネットワークとつながっているものもある。団粒内部の湿度含有は外部よりも高く、酸素圧は内部の方が低い。これらは、窒素固定やその他生物学的活動の発生を可能にする重要な特性である（Jones SOS）。

団粒を1つにまとめる重要な糊の1つが「グロマリン」と呼ばれる糖たんぱく質である。グロマリンと土壌団粒の安定性は密接に関連しているとみられる（Nichols）。何名かの科学者らによれば、1996年に発見されたグロマリンは土壌中の炭素の27%を占め、条件次第で40年以上存続すると考えられている。グロマリンは、アーバスキュラー菌根菌が、植物の液体炭素滲出液を使って生成すると考えられている。菌糸体が根と土壌粒子を結合させ空間に橋を架けることを可能にする（Comis）。

以上、土壌について、および、炭素が植物によってどのように供給され微生物との共生関係が促されているかについて理解してきた。ここで再度問いかけてみる。

異常気象を緩和するため、どうすれば迅速に十分な炭素を土壌へ戻せるか

私たちは上記において、大気中の二酸化炭素百万分の一に炭素が2.125Gt含まれることを見てきた。もしそれが本当なら、現在は400ppmで350ppmに戻す必要があり、50ppm、または106.25Gtの炭素は土壌に蓄積する必要がある。

それらすべての炭素は、元いた場所である土壌に適合することを理解した。産業化時代の到来で、開墾や農業によって土壌から136Gtの炭素が放出された。

しかしどうすれば迅速に炭素を戻せるだろうか？ 過去20年間、土壌への炭素の蓄積に関する多くの論考がなされてきた。農業光合成によって蓄積できる土壌炭素の割合を測定するための、多くの研究が行われてきた。私たちは5つの大陸にある数多くの異なる土壌の種類や様々な農業を対象に、過去10年間わたって実施されてきた研究を見てきた。これらの研究は異なる方法を用いており、結果も極めて多様である。しかしこれらの研究を読むといくつかのことがはっきりと明らかになった。

- 多年生の栽培体系は、他の農耕法よりも多くの炭素を蓄積できる。牧草ベースの全ての試験では、1エーカーにつき年間1.9～3.2トン、平均2.6トンという例外的な量の炭素が蓄積されたと報告されている（Machmuller, Rodale, IFOAM）。多年生の作付体系で、大量の土壌炭素を蓄積できたという報告はほとんどない。しかし多年生の木質作物にはそれが可能であるとの証拠がある。ある研究によれば、分解された鉱山の土壌は、マメ科植物の黒ニセアカシアを植え下生えのバイオマス植物として短い周期で育てると、1エーカーにつき年間2.8トンの炭素を蓄える（Quinkenstein）。多年生木質や草本作物の土壌蓄積への寄与を完全に評価するには、さらなる研究が必要である。

- 合成化学肥料、とりわけ窒素とリンの使用は、土壌炭素の蓄積を大幅に減少させるか、多くの場合全ての蓄積を除去する。一方で有機肥料や堆肥の適切な使用は、土壌炭素の増加を妨げないと考えられている（Jones SOS, Rodale）。

- 列状栽培に関する研究では、合成化学薬品を使わずに育てた場合であっても炭素蓄積は1エーカーあたり0.23～1.66トン、平均0.55トンと、牧草での調査より少ないことが報告されている（Khorramdel, IFOAM）。

- 調査が行われた農業の質は、特に列状栽培の試験においてはさまざまだった。蓄積が著しく多いと報告された実質全ての列状栽培は、化学肥料ではなく有機肥料や堆肥を使用していた。しかし、土壌を常に植物で覆う、幅広く混合した被覆作物を使用する、耕作を最小限に抑える、といったその他の炭素蓄積の原則がどの程度適用されていたかは不明である。一方、列状栽培で炭素蓄積が最も高いと報告されたケースでは、トウモロコシ畑1エーカーにつき1.66トンが蓄積され、調査では有機無耕農業が行われていたことは注目に値する（Khorramdel）。

これらの試行平均を考慮して、106.25Gtの炭素を土壌に蓄積できる農業の可能性について概算してみる。

FAOによれば、地球上には83億エーカーの草地と38億エーカーの耕作地がある。すべての人がこれらの土地に毎年炭素蓄積を実践したいと考えた場合、草地では、1エーカー

平均2.6トンにつき21.6Gt、耕作地では1エーカー平均0.55トンにつき2.1Gtを蓄積できる。合計で1年につき23.7Gtになる。目標は106.25Gtであるので、5年以内に達成できることになる！

安定炭素

もちろん、大量の炭素を土壤に蓄積したい場合は、微生物がそれらを吸収しないような方法で行わねばならない。さもないと最終的に微生物がそれらを燃焼させ大気中に再び二酸化炭素を放出させてしまう。多くの研究で、微生物が土壤有機物の保存を促した場合、その対処が確認できると分析されている。ある10年間にわたる調査では、有機物質を1つの区画に取り込んだ場合と、同様の区画からそれらを取り除いた場合とを比較した。別の31年に及ぶ調査では、別々の区画に、異なる周期と肥料を使用して比較し、土壤に戻す炭素の量を最大50%変化させた。さらに別の調査では、作物残渣が長年にわたり燃焼された区画と、残渣が土壤に取り込まれた区画とを比較した。いずれの調査でも、管理方法が異なるにもかかわらず、研究者が最後に測定した区画間の土壤有機物の量に大きな差は見られなかった（Kirkby）。

微生物が増殖して存在している全ての炭素を吸収してしまうと、高いレベルで土壤に蓄積することはできない。さらに、歴史的にみて、土壤有機物のレベルは6~10%が一般的であり、ところによって20%測定された（LaSalle）。何が、土壤生物を過去の分解有機物から保護しているのか？

長年、時には何世紀も、安定性を保つ炭素の1形態が腐植である。これは炭素を含む複合分子から構成されるが、土壤生物によって簡単に分解されることがない。腐植がどのように形成されるか、あるいはそれがどのように分解に耐えるかについて、科学者の間で完全な合意は得られていない。腐植について、根や根物質の微生物分解によって形成された、耐性が非常に高い形態の炭素だと考える人もいる（Ontl）。

また、土壤炭素の物理的保存を可能にするメカニズムには、鉱物への「吸着」によって微生物酵素の攻撃に抵抗する能力か、土壤団粒の保護のいずれかが関わりと考える人もいる。前者は、脅威となる酵素の攻撃に十分抵抗し得る、粘土粒子か土壤コロイドとの化学結合を提示する。後者は、土壤団粒から酵素やその他の分解要素を離すことで、土酵素の攻撃から分子を保護するとしている。別の理論は、土壤内の深さのため、土壤炭素が微生物の攻撃に近づけないとしている（Dungait）。

数名の科学者の中では、安定炭素は土壤有機物の残渣ではなく液体炭素それ自体から生成されとの見解が生まれている。この見解は、腐植を分解有機物が生み出したものではなく土壤生物が作り上げたものとみなしている（Meléndrez, Jones letter）。

この見解を支持する研究は、腐植は約60%の炭素、6~8%の窒素から構成される有機無機複合体でありリン、硫黄、鉄、アルミニウムを含む土壤鉱物と化学的に結合していると述べている。腐植の組成が、炭素と窒素だけでなく炭素と硫黄という主成分間の特定の割合に基づく、という証拠はいくつかある（Kirkby）。ある研究者は、腐植は、窒素が活発に固定され、リンと硫黄が可溶化した、団粒のような特定のマイクロサイト内ではしか形成されないと主張している（Jones letter）。

どうすれば土壤炭素を蓄積させ安定させることができるか？

土壤科学者が、腐植を形成する成分や微生物のプロセスについて明らかにすれば、私たちはその生成を補助する方法についての理解を深めることができる。しかし、土壤有機物の蓄積は、土壤に有機物質を加えるだけでは終わらないことを示す証拠がある。有機物質の追加は微生物群を繁栄させ作物を豊かに実らせるが、長期的に炭素を蓄積するためには他にもすべきことがある。

知っておくべきこと：土壤炭素を土壤に蓄積し保持するにはどのような方法を用いるべきか？

土壤への植樹を維持

恐らく最も重要な学びの1つが、植物が炭素を保護する一方で裸地土壤はそれを酸化するということだ。緑色植物は空気と土壤の間にバリヤを形成し、微生物による炭素排出のプロセスを遅らせる。風や水による浸食も土壤炭素の主要な敵であるが、植物を育てることは浸食に対する最大の防御になる。最後に、植物は土壤炭素を守るだけでなく、光合成の力を通してそれを増加させる。つまり露出したすべての土壤、例えば列状作物の間、耕した畑、作物を収穫したばかりの土地、休耕地などは炭素銀行の預金額を減らす。

土壤を覆うための冬季栽培や、マメ科植物や被覆作物の2季目の種をまく農法は、非常に重要である。作物を収穫したあとに、土壤炭素の生成を高め、浸食に抵抗し、土壤生物に食糧を与え、蓄積を高める、生産性の高い覆いが残るためだ（Azeez）。



耕作を最小限に

有機栽培農家にとって実践が最も難しい炭素修復方法の1つが、耕作を減少させることである。有機栽培農家は除草剤を使用しないため、土壌の耕作が雑草への最大の武器になる。しかし耕作はいくつかの弊害をもたらす。まず、土壌をかき回しそれを空気にさらすことで、露出した土壌に含まれる炭素が酸化する。第2に、植物の成長に重要であり液体炭素の滲出を高める共生においてその役割を果たす微生物、菌根菌の菌糸を、耕作ははがして破壊する。菌糸は繊細なネットワークのひもで、土壌に浸透して植物の根に水と栄養物を運ぶ。複数の研究において、耕作を減らした全ての土地で、菌類バイオマスが増加したと報告されている（Six）。第3に、窒素固定や炭素安定化など、重要な化学変換を保護する微生物浸出液を蓄積する複合土壌団粒が、耕作によって破壊される。第4に、耕作は、微生物に活力をもたらす空気や水の保持に欠かせない、土壌の孔隙を破壊する傾向がある。最後に、耕作それ自体、化石燃料で駆動する機器を使うことが多く、それらを使用することで温室効果ガスが排出される。

研究では、炭素修復レベルの高い有機的な作付体系は、無耕農業を実践し、牛糞肥料など多くの有機物質を土壌に加えるものであると報告されている（Khorramdel）。耕作を批判する人々は、数年に1度の耕作であってもそれによって、それまでに蓄積された炭素のほとんどが失われると報告している（Lal 2007）

無耕農業で得られた土壌炭素は、土壌断面を通じて深く浸透せず、ほとんどが表面付近に発生していると報告する研究もある。彼らはこれは問題だと主張している。なぜなら、腐食の形成と炭素の長期的安定性にとって最高の機会が、土壌のより深く、炭素が酸化に抵抗するため結合する粘土や鉱物の近くで発生しているからである。彼らはまた、無耕農業で生成された土壌有機物は、土壌表面付近の砂や土粒子の中のみに取り込まれ、いずれかく乱によって簡単に酸化すると主張している（Azeez）。

いくつかの研究は無耕農業で蓄積された有機物質の浅はかさを指摘しているが、一方でこの方法における、10～15年後の土壌有機物の遅い深化についても報告している。これは、恐らく有機物質分解の減少と、より大きな土壌生物による長期的な土壌混合との両方が原因と考えられている（Powlson）。

耕作を減らしている有機栽培農家向けに設計されたシステムや機器は、幾つか存在する。植ええや苗木に必要な大きさしか土壌を開けず、すぐにそれを閉じることのできる種まき機が販売されている。長い茎状被覆作物を、開花前に転がしてしわを寄せて枯れさせるが、土壌をかき混ぜることはないローラークリンパーも設計されている。被覆作物を刈り取ったまさにその場に市販されている作物を植える。土壌をかく乱することなく農家が雑草に対処することを可能にする、その他多くのアイデアが間違いなく開発されるはずだ。この分野ではさらなる進化が確実に必要とされている。

雑草を抑える別の方法が、マルチングを使って光が雑草に届くのを防ぐ方法である。最も簡単なマルチングはプラスチックのシートを使う方法である。ただしそれらの製造には通常、化石燃料が必要であり、除去にも手間と時間がかかる。干し草や刻んだ作物残渣などの有機物を使ったマルチングは、土壌に分解有機物を追加し炭素を蓄積する。しかし生物学的に見て、生きた土壌は継続的な物質の追加が必要であり、費用も時間もかかる。マルチングの大きな欠点は、それらが生きた植物のように、大気中から炭素を吸収し、光合成を介して土壌に固定させることをしない点である。

被覆作物

被覆作物は、耕作の削減や除去、雑草の抑制、土壌炭素の蓄積を行う有機栽培の戦略において絶対不可欠である。被覆作物にうってつけの作物は、開花前に（霜、刈り取り、粉砕などによって）枯らすことができ、種を作らず、雑草それ自体になるものである。それらの光合成は、生きながら土壌炭素の重要な資源となりそれらのバイオマスは枯れた後に使用できる。マメ科植物は被覆作物の混合において重要である。一年生ライグラスやライムギなど深く根を下ろす植物は土壌深くから栄養物をもたらす、窒素や炭素を深い場所へ戻すからである。

土壌炭素の増加に加え、被覆作物は窒素の浸出を減らし風や水の浸食を阻止する。土壌構造を改良し、水の浸透を高めて蒸発を減らす。また、ほとんどの栽培作物よりも高いレベルのリグニンを供給し、菌根菌の成長や、土壌粒子の蓄積を促すグロマリンのような菌の生成を助ける (Rodale, Azeez)

多様性と輪作

土壌に含まれる微生物の生命を補助するカギの1つが、多様性を促進することである。自然の原則の1つとして、システムの中により生物多様性が多く存在すればするほど、健全性と回復力のレベルも高くなる。それは土壌炭素の蓄積にも当てはまる (Lal 2004)。地下にある生物多様性は、微生物が、菌類、藻類、バクテリア、ミミズ、シロアリ、アリ、線形動物、フンコロガシ等から成る食物網の隙間を埋めることを可能にする。地上では、作物の多様性が寄生虫の成長と拡散を防いでいるところで、単一栽培が害虫や病気を招いている。これは作物と被覆作物の両方に適用される。そこでは、広葉草、マメ科植物や非マメ科植物、涼しい気候と温暖な気候、湿気と乾燥など、異なる種類の多くの植物が含まれねばならない。どのような条件であれ、繁栄し光合成を行うことができるものがなければならない。「被覆作物のカクテル」は被覆作物のさまざまな種を数多く混合したものであり、生物多様性を確保するために使用できる。

輪作もまた、生物多様性を助ける。被覆作物の継続的な輪作は、土地をリフレッシュする休閑期の必要をなくし、土壌酵素の活動を高める。微生物バイオマスは、マメ科植物が輪作に含まれるとより数が増える (Six)。

反芻家畜も、有機農家が土壌有機物レベルを改良する際の一般的方法である。家畜それ自体が成長を促し、草の根からはがれ落ち、炭素を土壌微生物に提供する。牧草と多年生のシステムは、適切に管理されれば有機物質の急速な増加が示される。動物の肥やしは小規模な混合農家にとって最も貴重な生成物の1つであり、土壌に生物多様性をもたらす炭素と生きた微生物の両方を豊富に含む。



化学物質は使用しない

合成農薬を使用すると、土壌炭素が破壊される。農薬のような毒は、植物の生命力や光合成を高める際に重要な役割を果たす土壌生物を死滅させる。肥料も、土壌有機物を激減させることが示されている。10年にわたって輪作で堆肥飼料を使用した、ロデール研究所による堆肥活用試験では、炭素の蓄積が1エーカーあたり年間1.0トンに上昇した。しかし、輪作をせずに合成肥料を使用すると、炭素は1エーカーあたり年間0.15トン失われた（LaSalle）。

イリノイ大学のモロー・プロツは、歴史上最も長く、管理された農業試験を行っている施設の1つであった。研究者は、1エーカーあたり合計90～124トンの炭素を50年にわたり追加してきた畑のデータを分析した。しかし同時に合成窒素肥料も使用していた。土地は、試験期間中に1エーカーあたり約5トンの土壌有機物を失っていた（Khan）。

合成肥料による土壌炭素への悪影響の原因の1つとして考えられるのは、合成肥料が、マメ科植物、鉍物、またはその他自然資源の栄養素として土壌全体に行き渡るのではなく、土壌の浅い部分に濃縮されるため、植物の根のサイズと深さを削減する傾向があるからとされている（Azeez）。もう1つの理由として、アンモニウムイオンを吸収する植

物への影響が考えられる。それによって土壌を酸性化する水素イオンが放出されるためである（Hepperly）。第3の可能性は、遊離窒素が利用できるようになったため、微生物から窒素を取得するために植物から滲み出る液体炭素の量が、少なくなることである。合成窒素肥料を使用してきたがそれを止めたい場合は、3～4年かけて徐々に減らしていくのが賢明である。窒素固定微生物が土壌に蓄積されるまで時間を要するためである。急にやめると、最初の年の収穫高は残念なものとなる可能性が高い（Jones SOS）。

牧草

以前、適切な放牧は、土壌炭素を蓄積する農法として効果が高いと述べた。列状栽培から中央管理的な放牧への、土地の転換に関する最近の研究では、1エーカーあたり年間3.24トンという高い炭素蓄積が示された。これは南米のサバンナに植えられた、根の深いアフリカの草の範囲で、達成率は1エーカーあたり年間2.87トンの炭素だった（Machmuller）。

炭素固定が効率的である放牧の一部は、恐らくいくつかの草がC₄光合成化学経路を使用している事実と関係している。この経路はより一般的なC₃経路と分離して発達する。とりわけ水含有が低く、光が多く、温度が高い状況に適しているC₄光合成は、顕花植物のたった3%にしか使用されていないが、土地のすべての炭素固定の25～30%の要因となっている（Muller）。

反芻動物の数が増すことを懸念する人もいる。消化の過程で第一胃にバクテリアを使用し、温室効果ガスのメタンを吐き出すためである。生態学的環境においては、メタン資化性のバクテリアであるため問題はない。これは多種多様な生育環境に存在しメタンのみを食糧とするもので、すばやく代謝する。実際、メキシコ湾原油流出事故では、約220,000トンのメタンが海面に湧き出たが、メタン資化性バクテリアの量が急増したことですばやく吸収された。反芻動物のメタン排出が問題となるのは、反芻動物が生物学的に活発な土壌を自ら離れて、飼養場や合成化学薬品が過剰に使用された土壌などにいるときのみである（Jones SOS）。

森林

分解した土壌で森林を覆う方法は、土壌炭素を高める方法として提案されてきた。他の植物同様、森林の土壌炭素修復の割合は気候、土壌の種類、生物種、栄養管理に応じて異なる。研究では、森林における土壌炭素は一般に、少ない蓄積に終わるか、結果的にマイナスになるケースもあるとされている（Lal 2004）。しかし、木本の適切な管理を行えば土壌炭素の量がかなり増えとの主張もある（Quinkenstein）。また、森林再生は気候の緩和や水循環の修復などにもつながる。

バイオチャー

炭化残留物を使って、炭素を土壌に蓄積しながら土壌肥沃度を向上させる方法の可能性は、最近注目を集めている。アマゾンのテラ・プレタなど、人為起源の黒い土は800年以上前の炭素を豊富に含み、提案者はこれらの土壌が今日も維持している高い肥沃性に言及している。その他の炭素を含む土壌はモリソルで、世界の穀物収穫量の多くを生産している北米、ウクライナ、ロシア、アルゼンチン、ウルグアイなどの、広範な草原から生成された土壌である。これらの土壌の炭素は、大昔に発生した草原火災に起因する。これら炭素残留物の実際の化学的性質は、つい最近研究が始まったばかりである。その安定性と肥沃性は、微生物に提供されている内部の保護生育環境か、大きな陽イオン交換機能（植物の栄養に必要な鉱物のイオンを保持する機能）を形成する、炭素の分子構造に関係するとみられている（Mao）。

バイオチャーはまだ広範囲な研究は行われていないが、研究者らは、バイオマス炭素をバイオチャーに転換することで、土壌中の初期炭素の約50%を長期間分離することができ、炭化炭素を土地に直接加えた場合よりも安定的で長期的に持続する土壌炭素が生じると主張している（Dungait）。

もちろん、炭素をバイオチャーに転換するには炭素の発生源や土地利用の影響に関するライフサイクル評価と、それを処理し適用するエネルギーが必要である。しかし、バイオチャーが、土壌中の不安定で容易に分解する有機物質に安定性を加える良い方法であるとの証拠もある（Powlson）。

土壌に炭素を蓄積することの利点

有機物質を土壌に蓄積することの利点は、二酸化炭素を大気から取り除くことだけに限らない。

水

土壌炭素が蓄積した団粒が増えると、それは代わりにスポンジの役割を果たして土が水を保持することを可能にし、雨の少ないときには貯めたものを根に供給し、雨が多い時には過度な水を吸収する。雨を保持するこの機能は浸食のリスクを減らし、結果的に作物の品質と収穫量を改良する。栽培者の中には、混植または被覆作物が利用可能な全ての水や栄養素を使い果たすと考えている人もいる。それとは反対に、植物多様性を備えた土壌微生物を支援することが、作物の栄養吸収や水分保持を改善している（Jones SOS）。

興味深いことに、1930年代からミシシッピ川の平均最大値と平均最小値の水位は、極端を越えている。洪水位はより高く、低水位はより低くなっている。これは、水が土壤に浸透できないために起こる。良く浸透していれば、水は植物の生育に供給されたり、土壤を通じて泉や川にゆっくりと供給されて河川水系の永続的な基底流量をもたらす。しかし被覆植物が乏しいと、土壤蓄積は消え、水はうまく浸透しない。そうして洪水では水が表面を流れて土壤を浸食し、干ばつでは土壤に水がないため植物や、泉や川に供給されなくなる（Jones SOS）

菌が優勢

科学者らは、土壤の菌類とバクテリアの高い比率が、植物の生産に非常に重要であることを発見した。もし手元にあれば一握りの土の香りで判断することができる。香りは酸ではなくマッシュルームのような香り。それが菌類であり植物の根に必要な応じて水と栄養素を供給する。残念なことに、多くの農業用土壤は菌ではなくバクテリアが優勢な土壤である。しかし露出土壤を避け、耕さず、多くの種を含む被覆作物を使い、高濃度だが短期間の放牧で十分な休閑期を持てば、土壤は菌が優勢なものへと転換する。

より良い作物

植物は、動物同様、敵に対する複雑な防御を進化させてきた。そのメカニズムは数が多くまた賢明である。他の植物をまねたり自らカムフラージュしたりするなど、視覚的防御を用いることで発見されにくくするもの。分厚い細胞の壁、ろう状の表皮、硬い樹皮などの武器を装備して困難な敵を攻撃するもの。はり、とげ、ガムのような粘着状の滲出液を使って捕食を阻むもの。多くは、合成二次代謝産物によって化学的に攻撃を防いでいる（毒、忌避作用、刺激、あるいは植物の捕食者の敵を引き付ける揮発性有機化合物もある）（Wink）。植物はまた、土壤の病原体を阻み、それによって植物を攻撃から保護するバクテリアとの共生関係を作っている。

このような能力は、動物における免疫系と同じように、植物が健康であるときに最強になる。こうした健康は、必要な日光、栄養、水、酸素、二酸化炭素が十分に満たされたときに最適になる。もちろん、高い炭素含有量と多様で豊富な微生物を含む健康な土壤に植えられているとき、それは最高になる。これらの条件は、栄養豊富な作物、害虫や病気への抵抗、より多くの酸化防止作用とより長い保存寿命につながる（Gosling, Wink, Reganold）。

病気や捕食に阻害されず必要な栄養が満たされている植物は、繁栄し豊かな収穫量をもたらす。また健全な植物は、揮発性分子の多くと、作物の味と香りを生成する高い代謝物とを生合成する。従って、土壤に炭素を還元することはすべてにおいて利点がある。

農家は収穫量を高められ、栽培者は美味しい作物を作ることができ、消費者は健康な食品が手に入る。

まとめ

有機物質を土壌に蓄積し安定化させるために生物学を使用することは、土地や作物を管理する人々にとって有益であるだけでなく、私たちの社会にとって不可欠である。私たちは土壌からあまりに多くの炭素を取り除き、燃やし、二酸化炭素として大気に放出させてきた。明日にでも化石燃料の燃焼を止めたとしても、放出済みの温室効果ガスは地球の温度を今後も上昇させ続け、将来長きにわたって有害なガスを放出し続ける。

生き延びたいのであれば、私たちには土壌に炭素を蓄積する以外に方法はない。そしてそれが、生物学を通して、何百万年ものあいだ作用し続けてきた方法を用いて実行することは胸が躍る。農家、栽培者、自宅所有者、造園家など、土地を所有・管理している人ならだれでもこれらのシンプルな原則に従うことができる。炭素を土壌に蓄積するだけでなく、大気を再生するために自然が取り入れた優れたシステムを再構築し、同時に食糧や美と健康を地上の全ての生物にもたらしすることができる。

How organic farming can save the world!



Our poor Earth.

Day after day, carbon dioxide gas is pumped into the air, warming up our planet and threatening our environment.



Fortunately for us, there's a solution -- and it's right underneath our feet



Organic farming is here to save us! TA-DAH!



Good soil management helps promote the growth of healthy plants that absorb sunlight.



Plants then use their own chlorophyll along with carbon dioxide and water to produce -- carbohydrates!



Some of the sugars in these 'liquid' carbohydrates are 'leaked' or exuded down through the roots and, like magic, attract hungry microbes in the ground -- like bacteria and fungi.



Together, green plants and organisms in the ground protect and promote each other's health.



Best of all, this process locks the carbon into organic matter, can create humus in the soil (learn how in this paper) and...



...that keeps our planet healthy!



nofo NORTHEAST ORGANIC FARMING ASSOCIATION